

# Behavior of hydrogen in the interior of the planets and satellites

著者	柴? 裕樹
number	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第2658号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/56810">http://hdl.handle.net/10097/56810</a>

氏名・(本籍)	しば ざき ゆう き 柴 崎 裕 樹
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2 6 5 8 号
学位授与年月日	平成 23 年 9 月 8 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地学専攻
学 位 論 文 題 目	Behavior of hydrogen in the interior of the planets and satellites (惑星および衛星内部における水素の挙動の解明)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 谷 栄 治 教 授 掛 川 武 教 授 藤 巻 宏 和 教 授 吉 田 武 義 教 授 石 渡 明 教 授 塚 本 勝 男

## 論 文 目 次

Acknowledgements

Abstract

Contents

Chapter 1 :

*Introduction*

1-1. <i>Light elements in core</i>	1
1-2. <i>Hydrogen in planetary and satellite cores</i>	2
1-3. <i>Behavior of Hydrogen in Mars</i>	3
1-4. <i>Motivations of this study</i>	5
Figures of Chapter 1	6
References of Chapter 1	9

Chapter 2 :

*Sound velocity measurements in dhcp-FeH up to 70 GPa with inelastic X-ray scattering: Implications for the composition of the Earth's core*

2-1. INTRODUCTION	13
2-2. EXPERIMENTAL METHODS	15
2-2-1. <i>Sample preparation</i>	15

2-2-2. <i>Inelastic X-ray scattering</i>	16
2-2-3. <i>In situ X-ray diffraction</i>	16
2-3. RESULTS	17
2-3-1. <i>In situ X-ray diffraction</i>	17
2-3-2. <i>Inelastic X-ray scattering</i>	17
2-4. DISCUSSIONS	20
2-4-1. <i>Comparison of the IXS results with the previous NRIXS results</i>	20
2-4-2. <i>Relation between Birch's law and magnetism</i>	20
2-4-3. <i>Hydrogen abundance in the Earth's inner core</i>	21
2-5. CONCLUSIONS	25
Tables and figures of Chapter 2	26
References of Chapter 2	46
Chapter 3:	
<i>Effect of hydrogen on the melting temperature of FeS at high pressure: Implications for the core of Ganymede</i>	
3-1. INTRODUCTION	52
3-2. EXPERIMENTAL METHODS	54
3-2-1. <i>In situ X-ray diffraction</i>	54
3-2-2. <i>Sample preparation</i>	54
3-2-3. <i>Hydrogen concentration in FeSH<sub>x</sub></i>	55
3-3. RESULTS	58
3-3-1. <i>Diffraction profile results</i>	58
3-3-2. <i>Volume expansion due to hydrogenation</i>	58
3-3-3. <i>Phase relationships of FeSH<sub>x</sub></i>	59
3-4. DISCUSSIONS	61
3-4-1. <i>Comparison FeSH<sub>x</sub> with FeH<sub>x</sub></i>	61
3-4-2. <i>Ganymede's core models</i>	62
3-5. CONCLUSIONS	65
Tables and figures of Chapter 3	66
References of Chapter 3	86
Chapter 4:	
<i>Summary</i>	91

## 論文内容要旨

In order to understand the behavior of hydrogen in the core of the terrestrial planets and icy satellites, two types of high-pressure experiment on the iron-hydrogen system were carried out. The first work is a sound

velocity measurement in iron hydride with inelastic X-ray scattering. The second work is a melting temperature measurement of a FeS-H system by in situ X-ray diffraction.

Firstly, the density evolution of the sound velocity of iron hydride up to 70 GPa at room temperature has been determined by inelastic X-ray scattering and by X-ray diffraction. It is found that the variation of  $V_P$  with density is different for the ferromagnetic and nonmagnetic iron hydride, and that only nonmagnetic iron hydride follows Birch's law. Combining this result with Birch's law for iron and assuming an ideal two-component mixing model, I obtain an upper bound of the hydrogen content in the Earth's inner core, 0.23(6) wt% H, corresponding to  $\text{FeH}_{0.13(3)}$ . The iron alloy with 0.23(6) wt% H can satisfy the density, compressional, and shear sound velocities of the Preliminary Reference Earth Model (PREM) inner core, assuming that there are no other light elements in the inner core.

Secondly, the melting temperature and phase relationships of  $\text{FeSH}_x$  have been determined up to 16.5 GPa and 1723 K based on in situ powder X-ray diffraction data. The melting temperature of  $\text{FeSH}_x$  was reduced by 150-250 K comparing with that of pure FeS. The hydrogen concentration in  $\text{FeSH}_x$  was determined to be  $x = 0.2-0.4$  just before melting occurred between 3.0 and 16.5 GPa. According to this result, hydrogen dissolved in Ganymede's core, one of the Galilean satellites of Jupiter, lowers the melting temperature of the core composition, and so today, the Ganymede's core could have solid  $\text{FeSH}_x$  inner core and liquid  $\text{FeH}_x$ - $\text{FeSH}_x$  outer core.

## 論文審査の結果の要旨

柴崎裕樹提出の論文は、高圧条件にある天体内部における水素の挙動を明らかにしたものである。この論文は3つの章からなる。第一章では、太陽系の惑星や衛星における水素の重要性についての概論である。第二章では、地球核の軽元素の候補として水素の可能性を評価するために、高圧下において放射光X線非弾性散乱法にもとづいて、鉄水素化合物 dhcp-FeH 相の音速測定を行った結果を述べている。第三章では、FeS と水素の高温高圧下での反応を解明し、氷天体の核における水素の重要性を指摘した。

第二章においては、ダイヤモンドアンビル高圧装置に鉄と水素を封入し、加圧することによって dhcp-相である FeH を合成し、その試料の音速を 6-70 GPa の範囲で、放射光X線非弾性散乱法を用いて縦波速度の測定をおこなった。その結果 FeH 相は 30 GPa 付近で常磁性体から非磁性体に転移する。この転移にともなって、密度と音速の関係が変化することを見出した。高圧で安定な非磁性体の密度と音速の関係を Birch の法則にしたがって外挿し、内核境界 (330 GPa) における密度と音速を求めた。この実験結果とこれまでに報告されている hcp-Fe の音速の測定値を用いて、内核境界の圧力において、内核の密度と音速を満足する水素量を推定した。その結果、核中に含まれる水素量は、約 0.23 (6) wt.% 程度であることを明らかにした。

第三章においては、ガニメデの核の候補である FeS と水素の反応実験を 16.5 GPa, 1723 K までの条件で行った。実験には、スプリング-エイトに設置されているマルチアンビル高圧装置を用いて、水素の存在下で存在する高圧相および融点を X 線その場観察法によって明らかにした。水素雰囲気では、FeSH<sub>x</sub> 相 (X=0.2-0.4) が生成し、その融点は FeS に比べて約 200 K 程度減少することを明らかにした。この実験結果を Fe-FeS-H 系に適用して、ガニメデの核の構造を議論した。ガニメデには磁場が存在することが明らかになっている。磁場が安定に存在するには、固体の内核の存在が必要である。内核が存在するためには、ガニメデの核に多量の硫黄と水素を含まれ、内核が FeSH<sub>x</sub> 相であることが必要であり、硫黄が少なく鉄の多い条件では融点が水素によって大幅に低下し、ガニメデの核は全溶融し固体の内核が存在し得ないことが明らかになった。

以上の研究は、柴崎裕樹が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、柴崎裕樹提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。